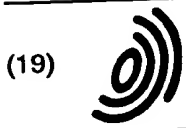


00P 15779



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) EP 0 715 266 A2

B3

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
05.06.1996 Patentblatt 1996/23

(51) Int. Cl.⁶: G06F 17/50

(21) Anmeldenummer: 95118590.9

(22) Anmeldetag: 25.11.1995

(84) Benannte Vertragsstaaten:
CH DE ES FR GB LI NL SE

(30) Priorität: 02.12.1994 DE 4442963

(71) Anmelder: ABB
PATENT GmbH
D-68309 Mannheim (DE)

(72) Erfinder: Küssel, Reinhard
D-69198 Schriesheim (DE)

(74) Vertreter: Rupprecht, Klaus, Dipl.-Ing. et al
c/o ABB Patent GmbH,
Postfach 10 03 51
68128 Mannheim (DE)

(54) Verfahren zur Initialisierung und Aktualisierung eines Netzmodells

(57) Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Initialisierung und Aktualisierung eines Netzmodells, wobei die Netztopologie in Form eines Netzgraphen gebildet wird und die Aufgabe zugrundeliegt, ein Verfahren anzugeben, das mit einem Rechnerprogramm realisierbar ist, das mit einer kurzen Rechenzeit abarbeitbar ist. Solche Verfahren finden beispielsweise in Netzleitrechnern eines elektrischen Energieversorgungsnetzes Anwendung, wobei die ermittelte Netztopologie Basis für Anzeigen oder Berechnungen ist.

Beim erfindungsgemäßen Verfahren wird die Netztopologie unter Anwendung und Erweiterung von Sparse-Vector-Verfahren und Sparse-Matrix-Verfahren

durch nachstehende Schritte gebildet: Bereitstellung erfaßter Netztopologiedaten in Form einer Terminal-Adjazenz-Matrix, Umformung der Matrix in eine obere Dreiecksmatrix, Initialisierung der oberen Dreiecksmatrix, Bildung der Matrixprodukte für Zeilen der oberen Dreiecksmatrix, Bildung einer Pfad-Tabelle aus der oberen Dreiecksmatrix, Aktualisierung der oberen Dreiecksmatrix im Fall einer Änderung der erfaßten Netztopologiedaten, Aktualisierung der Pfad-Tabelle und Kennzeichnung der Komponenten des Netzgraphen anhand der Pfad-Tabelle.

Terminal	erste benutzte Spalte in adjPunkte[]
1	6
2	8
3	7
4	9
5	6
6	7
7	9
8	0
9	0

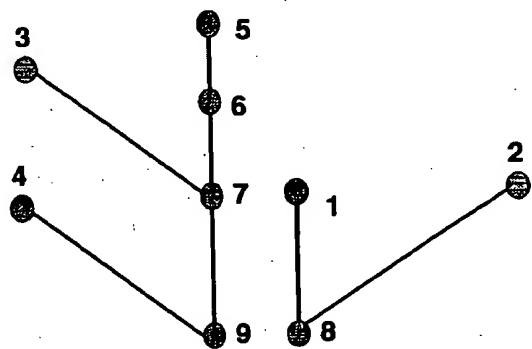


Fig. 12: Inhalt der Struktur PathTable[] und der Path Graph für obigen modifizierten Beispielgraphen

EP 0 715 266 A2

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Initialisierung und Aktualisierung eines Netzmodells, wobei die Netztopologie in Form eines Netzgraphen gebildet wird.

Das Netzmodell kann sich auf Netzwerke unterschiedlichster Art beziehen, z.B. auf elektrische Netze, Gasnetze oder Nachrichtennetze. Nachstehend wird jedoch zur Vereinfachung stets von einem elektrischen Energieversorgungsnetz gesprochen.

Zur Überwachung und Führung elektrischer Netze ist die Kenntnis und Darstellung des topologischen Netzzustandes sowie die Verfolgung der Netzspannung von grundlegender Bedeutung. In den Leitrechnern von Netzführungssystemen werden deshalb topologische Netzmodelle als Prozeßabbilder des zu führenden Übertragungs- oder Verteilnetzes aufgrund statischer Informationen, den Topologie-Daten des Netzes initialisiert und gehalten und aufgrund von ferngemeldeten Schaltermeldungen und Meßwerten (dynamische Informationen) fortlaufend aktualisiert.

Die topologischen Netzmodelle werden für unterschiedliche Zwecke verwendet, z. B. zur graphischen Darstellung des aktuellen Netzzustandes, vorzugsweise durch Einfärbung von Teilen des dargestellten Netzes, wie z.B. beschrieben von W. Grein et al. in "Dynamic Network Colouring", Proceedings of the Eighth Power Systems Computation Conference (PSCC), Helsinki, 19-24 August 1984, Seiten 489 bis 496. Auch als Auskunftsfunktion für globale Verriegelungen, z.B. Schalten auf Erde, oder als Grundlage für Berechnungen. Solche typischen Berechnungen können sich auf einen konsistenten Netzzustand (State Estimation) oder simulierten Netzzustand (Lastflußberechnung) beziehen. Weiterhin gibt es separate Berechnungsfunktionen zur Bestimmung von lokalen Feldtopologien.

Bekannte Verfahren zur Initialisierung und Aktualisierung beruhen auf Algorithmen für Graphen oder spärlichen Adjazenz-Matrizen. Diese Verfahren machen es erforderlich, um den Netzzusammenhang zu ermitteln (Initialisierung), den Graphen des Netzes zu durchsuchen und für jede Komponente einen Spannbaum zu bestimmen. Für große Netze bedeutet dies einen erheblichen Aufwand. Deshalb wird bei einer Schalteränderung versucht, nur die wirklich notwendigen Änderungen (Update) an den Datenstrukturen, die den Netzgraphen oder die spärliche Adjazenzmatrix beschreiben, durchzuführen. Die Bestimmung dieser notwendigen Änderungen kann je nach Netzänderung sehr aufwendig sein. Das Verhältnis von Update zu Initialisierung ist für merkliche Änderungen deshalb in der Größenordnung von 1:10. Im Störfall laufen in das Leitsystem eine Vielzahl von Schaltermeldungen ein, die sequentiell von der Topologiefunktion verarbeitet werden müssen. Um den Leitrechner in kritischen Situation nicht mit einer fortlaufenden sequentiellen Verarbeitung topologischer Updates zu überlasten, werden Überlastverfahren eingesetzt, die je nach Situation einen Topologie-Update oder eine Topologie-Initialisierung veranlassen. Alle bisher bekannten Update-Verfahren sind aufwendig, komplex und im mathematischen Sinne nicht abgeschlossen und deshalb fehleranfällig. Aufgrund der Komplexität sind die entwickelten Programmpakete sehr umfangreich sowie die damit verbundene Programmpflege und die Einarbeitung neuer Mitarbeiter in die Anwendung dieser Programme sehr aufwendig.

Auf dem Gebiet der Sparse-Vektor-Verfahren und -Matrix-Verfahren sind Algorithmen entwickelt worden, die auch für große elektrische Netze im Rahmen von Netzberechnungen einsetzbar sind. Solche Verfahren sind z.B. beschrieben von V. Brandwajn et al. in "Sparse Vector Methods", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 4, February 1985, Seiten 295 bis 301. In dieser Veröffentlichung sind auch Begriffe wie Netzgraph oder Pfad-Tabelle erläutert, die in dieser Beschreibung verwendet werden. Die von Brandwajn et al. beschriebenen Berechnungsverfahren setzen eine Netztopologie bereits als vorhanden voraus. Eine Untersuchung zu Anwendungsmöglichkeiten solcher Verfahren zur Topologiebestimmung ist nicht bekannt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Bestimmung der Netztopologie anzugeben, das eine vergleichsweise wenig aufwendige und schnell durchführbare Initialisierung und Aktualisierung eines Netzmodells ermöglicht.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zur Initialisierung und Aktualisierung eines Netzmodells gelöst, das die im Anspruch 1 angegebenen Verfahrensschritte aufweist.

Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in weiteren Ansprüchen angegeben und der unten stehenden Erläuterung der Erfindung anhand von Beispielen zu entnehmen.

Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht eine um Größenordnungen schnellere Initialisierung oder Aktualisierung eines Topologiemodells als bekannte Verfahren. Außerdem ist die Aktualisierungs-(Update-)Zeit weitgehend unabhängig von der Netzgröße.

Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung wird mit einer topologischen Adresse gearbeitet, die die Dateneingabe vereinfacht, und die es ermöglicht, lokale topologische Funktionen, z.B. Feldtopologien in die Netztopologieberechnung zu integrieren. Meßwerte werden dabei auch als topologische Objekte modelliert, wodurch sich die Dateneingabe vereinfacht und eine exakte Beschreibung auch solcher Netzkonfigurationen möglich ist, bei denen bisher zusätzliche Pseudo-Netzelemente vorzusehen sind.

Netzberechnungen, die auf der modellierten Netztopologie basieren können durch Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens wesentlich beschleunigt werden, weil notwendige Datenstrukturen und Verarbeitungsschritte schon in dem vorgeschlagenen Verfahren enthalten sind. Neue Impulse und Aspekte ergeben sich auch für Programme wie die (n-1)-Ausfallrechnung und die topologische Beobachtbarkeitsanalyse. Alle diese Programme haben die Auswertung

von Topologievarianten des Netzes gemeinsam. Sie profitieren von dem schnellen Update-Verfahren. Deshalb werden für alle Aufgabenstellungen, bei denen Auswirkungen von Netzänderungen sehr schnell festgestellt werden müssen, wesentliche Verbesserungen erwartet. Das können z.B. Topologieverfahren für Nachrichtennetze oder auch Optimierungsverfahren mit Hilfe von Network-Flow Algorithmen sein.

Zur Erläuterung der Erfindung herangezogene Zeichnungsfiguren sind nachstehend aufgelistet.

Es zeigen:

- Fig. 1 Stationen und EVU-Stationen,
- Fig. 2 Aufbau eines Feldes in einer EVU-Station,
- 10 Fig. 3 Adressentransformation,
- Fig. 4 Meßwertzuordnung,
- Fig. 5 Beispielgraph,
- Fig. 6 Terminal-Adjazenz-Matrix und deren LDU-Zerlegung,
- Fig. 7 Initialisierung der oberen Dreiecksmatrix,
- 15 Fig. 8 Ganzzahlig initialisierte obere Dreiecksmatrix,
- Fig. 9 Pfad-Tabelle und Pfad-Graph (Beispiel),
- Fig. 10 Mathematische Formulierung von Initialisierung und Update,
- Fig. 11 Ganzzahlig aktualisierte obere Dreiecksmatrix,
- Fig. 12 Pfad-Tabelle und Pfad-Graph für modifizierten Beispielgraphen,
- 20 Fig. 13 Knoten-Zweig-Netz,
- Fig. 14 Ableitung der Knoten-Admittanz-Matrix,
- Fig. 15 Testgraphen für Leistungsmessung,
- Fig. 16 Fiktive Zweige in Abhängigkeit der Netzgröße und des Vermaschungsgrads,
- Fig. 17 CPU-Zeit zum Aufbau der statischen Topologie (Testbeispiel),
- 25 Fig. 18 CPU-Zeit zur Initialisierung der statischen Topologie (Testbeispiel),
- Fig. 19 CPU-Zeit für die Aktualisierung (Testbeispiel).

Die unten stehenden Beispiele zur Erläuterung des Verfahrens basieren auf der nachstehenden vorteilhaften Definition einer externen und internen topologischen Adresse für elektrische Übertragungs- und Verteilnetze. Diese Definition vereinfacht die Dateneingabe und ermöglicht es, lokale topologische Funktionen (Feldtopologieberechnung) in die Netztopologieberechnung zu integrieren.

Elektrische Netze gleich welcher Spannungsebene können durch Endpunkte (Terminals) und deren Verbindungen (Zweige) beschrieben werden. Verbindungen sind hierbei impedanzbehaftete Netzelemente wie Leitung, Transformator oder Längsblindleistungselement etc., oder impedanzlose Netzelemente wie Leistungsschalter, Trenner oder Meßwertobjekt. Endpunkte sind externe topologische Adressen im Netz und können Netzelementen wie Sammelschienenabschnitten oder Teilen von Netzelementen z.B. den beiden Enden (Terminals) einer Leitung zugeordnet werden. Für elektrische Übertragungs- und Verteilnetze wird nun folgende topologische Hierarchie definiert:

- 1 Station (oder Geographische Station)
- 2 EVU-Station (oder Spannungsebene)
- 3 Feld
- 4 Terminal

Fig. 1 zeigt beispielhaft ein Netz, bestehend aus drei Stationen mit jeweils zwei EVU-Stationen. Fig. 2 zeigt den Aufbau eines Feldes in einer EVU-Station, der sich durch die verwendeten Symbole und die Beschriftung selbst erklärt.

Die externe topologische Adresse ergibt sich dann als Datenstruktur, die für jede dieser Hierarchiestufen einen Identifizierer enthält. Zum Beispiel kann die topologische Adresse des einen Endes der Leitung 1 in Station 1 (siehe Fig. 1 und 2) folgendermaßen spezifiziert werden:

1	Station:	1
2	EVU-Station:	1
3	Feld:	10
4	Terminal:	10

und folgendermaßen gelesen werden: Die beschriebene topologische Adresse befindet sich in Station 1, innerhalb der Station 1 in der EVU-Station 1, innerhalb der EVU-Station im Feld 10 und innerhalb des Feldes 10 am Terminal 10. Fig. 1 und Fig. 2 verdeutlichen die Vorgehensweise.

Für die Grenze jeder Hierarchiestufe gilt, daß diese nicht überlappen dürfen. Das heißt, jedes Terminal darf nur zu einem Feld, jedes Feld nur zu einer EVU-Station und jede EVU-Station nur zu einer Station gehören.

Aus der technologischen Beschreibung der Netztopologie können nun die abstrakten Endpunkte, d.h. die internen topologischen Adressen, des Netzgraphen über die folgend beschriebene Datenstruktur, die von der Datenaufbereitung bereitgestellt wird, sehr einfach und schnell ermittelt werden.

Die Transformation der externen in die interne topologische Adresse ist in Fig. 3 dargestellt und wird nachstehend beispielhaft beschrieben:

Zwischen $EvuStalnStation[i]$ und $EvuStalnStation[i+1]$ liegen alle EVU-Stationen der Station i . In der Datenstruktur $EvuStalnStation[]$ sind die Identifizierer enthalten, so daß die jeweiligen Teiladressen nicht dicht liegen müssen, sondern durch direkten Vergleich ermittelt werden. Ausnahme ist der Stationsidentifizierer, der als Index für $EvuStalnStation[]$ dient. Entsprechend werden die anderen Hierarchiestufen durchlaufen. Der schließlich ermittelte Index der Datenstruktur $Terminal[]$ ist die interne topologische Adresse des mit der externen topologischen Adresse spezifizierten Terminalpunktes. Die interne topologische Adresse wird als Index für die Endpunkte (interner Terminalindex) des Netzgraphen verwendet.

Durch die Berücksichtigung der Felder als Teiladresse ist die Ermittlung der Feldtopologie als impliziter Teil der Netztopologie möglich. Hierdurch können die Berechnungsfunktionen zur Ermittlung der lokalen Feldtopologien entfallen.

Auch Meßwerte und Schutzmeldungen lassen sich als topologische Objekte modellieren. Dies vereinfacht die Dateneingabe und ermöglicht die exakte Beschreibung aller Netzkonfigurationen, bei denen bisher zusätzlich Pseudo-Netzelemente vorzusehen waren.

Meßwerte sind ferngemeldete analoge Werte relevanter Prozessgrößen wie Spannung, Strom und Leistung etc., die im Leitreechner angezeigt und auf Grenzwertverletzung überwacht werden. Bei Leitsystemen, die ebenfalls ein Topologiemodell im Leitreechner halten, werden die Meßwerte in Verbindung mit der Netztopologie und den elektrischen Parametern der Netzelemente zur Berechnung eines konsistenten und vollständigen Netzzustandes verwendet (State Estimation). Hierzu müssen Leistungsmeßwerte jeweils den adjazenten impedanzbehafteten Netzelementen und Spannungsmeßwerte den Knoten des Netzmodells zugeordnet werden. Als Knoten bezeichnet man hierbei alle impedanzlos zusammengeschalteten Netzelemente. Knoten werden durch impedanzbehaftete Zweige wie Leitungen und Transformatoren verbunden. Bisher werden bei der Dateneingabe Meßwerte und Netzelemente statisch verknüpft. Dies hat den Nachteil, daß für bestimmte Netzkonfigurationen die Meßwerte anders platziert werden müssen, als es ihrer tatsächlichen Netzanordnung entspricht. Diesen gravierenden Nachteil vermeidet man, wenn Leistungsmeßwerte als gerichtete impedanzlose Zweige und Spannungsmeßwerte als Objekte mit einer externen topologischen Adresse modelliert werden. Die schaltungsabhängige Zuordnung von Meßwert und Netzelement wird dann von der Netztopologie geleistet. Weiterhin wird die Zählpfeilrichtung der Meßwerte direkt von der Orientierung des Meßwertzweiges festgelegt. In Fig. 4 ist die beschriebene topologische Zuordnung dargestellt. Mit P sind Wirkleistungswerte, mit Q Blindleistungswerte bezeichnet. Je nach Schaltzustand der Schalter S1 bis S4 ergeben sich die in folgender Tabelle aufgelisteten Meßwertzuordnungen und deren Eigenschaften, wobei L1, L2 Leitungen sind.

S1	S2	S3	S4	Meßwerteigen- schaft	Zuordnung
EIN	EIN	EIN	EIN	Summen-Fluß	L1, L2
EIN	EIN	EIN	AUS	Einspeisung	Generator, Last
EIN	EIN	AUS	EIN	Einspeisung	Generator
EIN	EIN	AUS	AUS	Einspeisung	Generator
EIN	AUS	EIN	EIN	Fluß	L1
EIN	AUS	EIN	AUS	Fluß	L1
EIN	AUS	AUS	EIN	Fluß	L1
EIN	AUS	AUS	AUS	Fluß	L1
AUS	EIN	EIN	EIN	Fluß	L2
AUS	EIN	EIN	AUS	Fluß	L2
AUS	EIN	AUS	EIN	Fluß	L2
AUS	EIN	AUS	AUS	Fluß	L2
AUS	AUS	EIN	EIN	-	-
AUS	AUS	EIN	AUS	-	-
AUS	AUS	AUS	EIN	-	-
AUS	AUS	AUS	AUS	-	-

Tabelle 1: Topologische Meßwertzuordnung

Während bei der statischen Zuordnung der Meßwert nur einem Netzelement zugeordnet werden kann, ist durch die topologische Zuordnung in allen Fällen eine richtige Zuordnung bei gleichzeitig vereinfachter Dateneingabe möglich. Sinngemäß gilt die gleiche Vorgehensweise für gerichtete Schutzmeldungen wie Erdschlußwischermeldungen und Kurz-

schlußanzeiger, die für die Lokalisierung von Erdschlüssen oder Kurzschlüssen von der Topologiefunktion ausgewertet werden.

Unter Anwendung der vorstehenden Adressen-Definition erfolgt nachstehend eine ausführliche beispielhafte Beschreibung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Alle Verfahrensschritte lassen sich als Rechnerprogramm realisieren und mit Hilfe einer Datenverarbeitungseinrichtung automatisiert durchführen.

1. Aufbau der statischen Topologie

Der Graph des betrachteten Netzes besteht aus Endpunkten, sogenannten Terminals, sowie impedanzlosen und impedanzbehafteten Zweigen (Zweitoren) wie Schalter, Meßwerten, Verbindern sowie Leitungen, Transformatoren und Längsblindleistungselementen. Weiterhin gibt es zusätzlich Eintore wie Generatoren und Lasten, Spannungsmeßwerte und Erdungsschalter etc., die nur eine topologische Adresse sowie verschiedene Merkmale und Eigenschaften besitzen, die sie auf den zugehörigen Teilgraphen übertragen, wie z.B. *geerdet*, *spannungslos* oder *unter Spannung*.

Die Datenstruktur des Verfahrens basiert auf einer Terminal-Adjazenz-Matrix, die als vorwärts verkettete Liste abgelegt wird und bei der für jedes Terminal die adjazenten Zweige zugeordnet werden (im folgenden mit *Cst[]* bezeichnet). Für diese symmetrische Matrix, die reine Strukturinformationen enthält, wird eine optimale Eliminationsreihenfolge bestimmt und *Cst[]* um die hierbei zusätzlich entstehenden *Fill In* (fiktive Verbindungszweige) ergänzt. Aufgrund der Ähnlichkeit mit der numerischen LDU-Zerlegung einer Matrix wird im folgenden dieser Schritt *strukturelle Dreiecks- oder LDU-Zerlegung* genannt. Unter LDU-Zerlegung wird die Zerlegung einer Matrix in das Produkt einer Lower-, Diagonal- und einer Upper-Matrix verstanden, wobei die Lower- und Upper-Matrix jeweils Dreiecksmatrizen sind. Um die topologische Eigenschaft der *Fill In* zu verdeutlichen, werden diese im folgenden als fiktive Zweige bezeichnet. Wie im folgenden gezeigt wird, enthält die strukturelle Upper-Matrix (im folgenden mit *Parkett[]* bezeichnet) Information über die Konnektivität des Graphen, die bei Netzänderungen sehr einfach und schnell in *Parkett[]* aktualisiert werden kann.

Anhand des in Fig. 5 gezeigten kleinen Beispielgraphen werden die skizzierten Datenstrukturen verdeutlicht. Alle im Graphen abgebildeten Zweige sind Bestandteil der statischen Topologie. Die mit Großbuchstaben gekennzeichneten Zweige haben den Status *EIN*, die mit Kleinbuchstaben gekennzeichneten den Status *AUS*. In diesem Beispiel sind nur die internen Terminalindizes und Zweigbezeichner aufgeführt. Die Abbildung von externer auf interne Topologieadresse geschieht mit Hilfe der erläuterten Adresshierarchie und kann aus Übersichtsgründen hier einfach weggelassen werden. Ebenfalls ist der Zweigtyp in diesem Beispiel von untergeordneter Bedeutung. Auf eine detaillierte Beschreibung wird deshalb, ohne die Allgemeingültigkeit des Beispiels einzuschränken, verzichtet. Das Beispielnetz mit 9 internen topologischen Adressen und 16 Zweitoren oder Zweigen wird in den folgenden Stufen auf die oben skizzierte Datenstrukturen abgebildet.

Die Terminal-Adjazenz-Matrix für diesen Graphen und deren LDU-Zerlegung kann nun wie in Fig. 6 notiert werden. Die Matrixelemente enthalten zur näheren Erläuterung des Algorithmus die Bezeichner der zugehörigen Zweige. Die mit Δ gekennzeichneten Elemente der Matrix entsprechen den *Fill In*, d.h. den fiktiven Zweigen im Netzwerk. Die Reihenfolge der Terminals ist bei diesem Beispiel zur Vereinfachung schon optimal gewählt. Die interne Programmablage der Terminal-Adjazenz-Matrix geschieht als gedrängt abgespeicherte, vorwärtsverkettete Liste (*Cst[]*), die der LDU-Matrix als eindimensionales Array (*Parkett[]*) von C-Strukturen. Wegen der Struktursymmetrie wird nur die Upper-Matrix abgelegt. Im folgenden wird angenommen das alle Zeilen der Upper-Matrix und alle Elemente dieser Zeilen in optimaler Reihenfolge sortiert sind. Jedes Objekt der verketteten Liste bzw. des Arrays enthält für jedes Nichtdiagonal-Element den Terminalindex des gegenüberliegenden Terminals, den Index in der Zweigliste, den Status des Zweiges und den Zweigtyp.

2. Initialisierung der Upper-Matrix (vergl. Fig. 7, 8 und 10)

Jedes Element der Upper-Matrix wird aufgrund des zugehörigen Zweigstatus initialisiert: Status *EIN* \Rightarrow z.B. $K = \text{SCHAR_MIN}$ (-128, minimaler Wert eines Byte mit Vorzeichen); Status *AUS*: $\Rightarrow 0$. Die fiktiven Zweige erhalten den Status *AUS* (0). Für die so initialisierte Matrix wird folgende Prozedur durchgeführt und in Anlehnung an die rein ganzzahligen Operationen *ganzzahlige Initialisierung* genannt. Diese geschieht analog dem Matrix-Produkt aller Zeilen ab dem ersten Nichtdiagonalelement rechts der Diagonalen mit sich selbst:

Für alle Zeilen i

Für alle Zeilenelemente j, k der Zeile i rechts der Diagonalen, wobei $i=1..n$, $j=i+1..n$, $k=j..n$ und $n=\text{Anzahl Terminals}$:

Falls die zugehörigen Matrixelemente (i, j) und (k, i) ungleich 0 sind:

inkrementiere die Elemente aller zugehörigen Schnittpunkte des Zeilen- und Spaltenbruchstückes rechts bzw. unterhalb der Diagonalen in der Upper-Matrix um 1. Durch die Struktursymmetrie ist das Zeilen- und Spaltenbruchstück identisch

Für die erste Zeile in Fig. 7 ist der erste nichtdiagonale Schnittpunkt das Matrixelement $(5, 8)$ und diesem Element ist der Zweig f zugeordnet. Dieses Element ist mit 0 initialisiert und erhält den aktuellen Wert von 1.

In Fig. 7 ist dies für die erste Zeile verdeutlicht. Nach dieser ganzzahligen Initialisierung liegt nun die in Fig. 8 dargestellte Upper-Matrix vor. Normalgedruckte Kleinbuchstaben entsprechen ausgeschalteten Zweigen und haben den Statuszähler 0, normalgedruckte Großbuchstaben entsprechen eingeschalteten Zweigen und haben den Statuszähler $\text{SCHAR_MIN} + i$, wobei i durch die Anzahl der auf dieses Element ausgeführten Inkrementoperationen bestimmt ist. Die mit Δ gekennzeichneten Elemente der Matrix entsprechen den *Fill In*, d.h. den fiktiven Zweigen im Netzwerk, die entsprechend der aktuellen Topologie aufgrund der ganzzahligen Operationen den Zustand EIN oder AUS erhalten. Dies entspricht einem Statuszähler 0 oder i , wobei i durch die Anzahl der auf dieses Element ausgeführten Inkrementoperationen bestimmt ist. Die mit fett gedruckten Kleinbuchstaben bezeichneten Zweige haben zwar den aktuellen Status AUS, erhalten aber aufgrund der ganzzahligen Operationen den Status eines verbindenden Zweiges und haben ebenfalls einen Statuszähler von i , mit $i = \text{Anzahl Inkrementoperationen}$. Weiterhin kann der Status des Zweiges auch von seinem Typ abhängen, z.B. um spezielle Topologien, wie z.B. die Netzbezirkstopologie zu ermitteln. Zur Ermittlung der Netzbezirkstopologie sind alle Transformatoren als trennende Zweige vorzugeben.

Die Konnektivität des Graphen läßt sich nun sehr einfach aus der Pfad-Tabelle (*PathTable[]*) der Upper-Matrix *Parkett[]* ableiten (vergl. Fig. 9).

Diese Pfad-Tabelle enthält für jeden Terminalindex in *Parkett[]* den gegenüberliegenden Terminalindex des ersten adjazenten Zweigs. Diese Tabelle ist neben der Upper-Matrix die zweite wesentliche Datenstruktur dieses Topologieverfahrens. Aus ihr kann die Konnektivität des Netzgraphen leicht ermittelt werden. Diese Tabelle enthält so viele Einträge mit dem Wert 0, wie der Netzgraph in Teilgraphen zerfällt. Die in Fig. 9 dargestellte Pfad-Tabelle kann aus obiger Struktur *Parkett[]* abgeleitet werden. Diese Pfad-Tabelle enthält nur eine 0 und der Netzgraph ist deshalb zusammenhängend, wie leicht am Pfad-Graph in Fig. 9 zu erkennen ist.

Durch Zuordnung z.B. eines Farb Bezugspunktes für die Einfärbung des Netzgraphen oder eines Merkmals zur Kennzeichnung bestimmter Zustände zu einem Entry dieser Pfad-Tabelle (i.e. interne topologische Adresse oder Terminalindex), kann nun dem entsprechenden Teilgraphen die zugehörige Farbe oder Eigenschaft zugeordnet werden, indem der Pfad-Graph durchlaufen wird.

3. Update der Netztopologie(vergl. Fig. 10, 11 und 12)

Angenommen im Beispielgraph ändert sich der Status des Zweiges G von EIN nach AUS. Der ganzahlige Updatealgorithmus ermittelt nun Änderungen für mit \Rightarrow gekennzeichnete Matrixelemente, wie Fig. 11 zeigt.

5 Der Algorithmus kann für eine Ausschaltung bzw. Einschaltung eines Zweiges folgendermaßen formuliert werden:

Ausschaltung eines Zweiges:

10 Subtrahiere vom entsprechenden Element der Upper Matrix die Konstante K. Falls hierdurch dieses Element zu 0 wird¹:

Update AUS:

15 Für dieses Element:

dekrementiere für alle Schnittpunkte dieses Elementes mit
20 allen anderen Elementen ungleich 0 der zugehörigen Zeile
bzw. Spalte rechts bzw. unterhalb der Diagonalen, die
entsprechenden Elemente in der Upper-Matrix um 1. Für
jedes Element, das hierdurch zu 0 wird, wiederhole
25 Update AUS

Einschaltung eines Zweiges:

30 Addiere zum entsprechenden Element der Upper Matrix die Konstante K. Falls hierdurch dieses Element zu K wird¹:

Update Ein:

35 Für dieses Element:

dekrementiere für alle Schnittpunkte dieses Elementes mit
40 allen anderen Elementen ungleich 0 der zugehörigen Zeile
bzw. Spalte rechts bzw. unterhalb der Diagonalen, die
entsprechenden Elemente in der Upper-Matrix um 1. Für
jedes Element, das hierdurch zu 1 wird, wiederhole
Update EIN

45 ¹Nur dann hat die Zustandsänderung einen topologischen Einfluß und die Aktualisierung der Upper-Matrix darf stattfinden

50 Für dieses Beispiel führt die Dekrementierung des Matrixelementes (8,9) dazu, daß dieses Element den Wert 0 erhält. Daraus folgt, daß die aktualisierte Pfad-Tabelle einen weiteren Null-Eintrag erhält, d. h. der Netzgraph zerfällt in zwei Teilgraphen. Die in Fig. 12 dargestellte Pfad-Tabelle läßt sich aus der aktualisierten Struktur Parkett]] ermitteln. Es ist an der Pfad-Tabelle und am Pfad-Graph offensichtlich, daß der Graph in zwei Teilgraphen zerfallen ist. Eine Farbgebung oder die Weitergabe eines Merkmals ist durch die Bearbeitung der Pfad-Tabelle nun sehr einfach und sehr schnell möglich.

4. Lastflussschnittstelle

Die Struktur der LDU-Matrix für Lastfluß- oder Kurzschlußberechnungen erhält man in zwei Stufen. In der ersten Stufe werden alle impedanzlosen Zweige, außer den Meßwerten, zu Knoten zusammengefaßt. Anschließend werden die Meßwerte den impedanzbehafteten Netzelementen zugeordnet und in der zweiten Stufe die Meßwerte ebenfalls mit den Knoten verschmolzen. Fig. 13 zeigt ein Knoten-Zweig-Netz. Unterstellt man, daß die Zweige d,e,f,G,K impedanzlos sind, so kann aus *Parkett*] unmittelbar die (LD)U-Form der Knotenadmittanzmatrix extrahiert werden. Auf eine Meßwertzuordnung wird in diesem Beispiel verzichtet.

Die Terminals 1,5,6,8 verschmelzen in den Knoten 8, während alle anderen Terminals durch impedanzbehaftete Zweige verbunden sind und deshalb erhalten bleiben. Es ergibt sich also die in Fig. 14 dargestellte Upper-Form der strukturellen JACOBI- oder Knoten-Admittanz-Matrix.

Die Filter-Funktion eliminiert alle impedanzlosen Zweige und transferiert die betroffenen Zweigenden (Terminals) von impedanzbehafteten Zweigen zu den Terminals mit höherem Index, wie hier z.B. 1,5,6→8. Dies ist somit schon die Struktur der JACOBI-Matrix (Lastfluß) oder der Knoten-Admittanz-Matrix (Kurzschluß). Die weiteren Schritte einer Lastflußrechnung sind dann einfach durchführbar. Indem die LDU-Zerlegung schon auf der Ebene der Basis-Topologie (Schalter-Terminal) durchgeführt wird, können eine Vielzahl von Programmschritten entfallen. Diese Vereinfachung der Programme verbessert im erheblichem Maße die Rechenzeit und die Fehleranfälligkeit der Berechnungsprogramme wie State-Estimation, Lastfluß und Kurzschluß.

5. Testnetze

Fig. 15 zeigt die Form eines generierbaren Netzes, mit dem Performancetests für den Algorithmus durchgeführt wurden. Durch Parametervorgabe kann der Vermaschungsgrad VG des Netzes zwischen 0 und 3 und die Netzgröße beliebig vorgegeben werden. Der Vermaschungsgrad ergibt sich aus (1).

$$VG = \frac{\text{Anzahl Zweige}}{\text{Anzahl Terminals} - 1} \quad (1)$$

In elektrischen Übertragungsnetzen und Verteilnetzen variiert der Vermaschungsgrad zwischen 1 und 1,5. Für ein großes reales Verteilnetz ermittelt sich z.B. der zugehörige Vermaschungsgrad VG inklusive der einspeisenden 110kV Stationen und Umspanner folgendermaßen:

Anzahl Schalter (ohne Erdungsschalter):	9683
Anzahl Leitungen:	2100
Anzahl 110/10kV-Umspanner:	22
Anzahl 10/0,4KV-Netztrafos:	1200
Anzahl Zweige:	13005

Mit der Anzahl Terminals von 11.623 ergibt sich ein Vermaschungsgrad von $VG = 1,119$. Das bedeutet, daß die im folgenden vorgelegten Performancezahlen für $VG = 1,2$ bei großen Verteilnetzen als Obergrenze anzusehen sind.

6. Performance

6.1. Anzahl fiktiver Zweige über die Netzgröße in Abhängigkeit vom Vermaschungsgrad

Wie oben beschrieben, wird die Terminal-Adjazenz-Matrix in eine obere Dreiecksmatrix transformiert. Hierbei werden fiktive Verbindungszweige (*Fill In*) erzeugt. Die Anzahl zusätzlicher Verbindungszweige ist abhängig von der Reihenfolge der einzelnen Transformationsschritte und vom Vermaschungsgrad VG. Beim Aufbau der oberen Dreiecksmatrix wird die Reihenfolge der Transformationsschritte optimiert. Deshalb reduziert sich die Abhängigkeit auf den Vermaschungsgrad und die Anzahl Zweige, wie im Fig. 16 dargestellt. Die Anzahl fiktiver Zweige beeinflusst die Performance des vorgeschlagenen Verfahrens. Die weiteren Diagramme für die einzelnen Programmschritte zeigen dies deutlich.

6.2. Performance der einzelnen Programmschritte über die Netzgröße in Abhängigkeit vom Vermaschungsgrad

Die CPU-Zeit eines 80486 40MHz Rechners wurde für folgende Programmschritte in Abhängigkeit der Anzahl Zweige und des Vermaschungsgrades gemessen

1. Aufbau der statischen Topologiestruktur *Parkett*
2. Initialisierung der dynamischen Topologie auf Basis der aktuellen Status aller Netzzweige
3. Update der dynamischen Topologie aufgrund einer Statusänderung eines Zweiges

Fig. 17 zeigt die benötigte CPU-Zeit in 10 Mips*s für den Aufbau der statischen Topologie *Parkett*. Die Zeit für eine 100 Mips CPU ergibt sich dann durch Division mit 100 Mips.

Der Aufbau dieser Struktur *Parkett* ist der aufwendigste der 3 Verarbeitungsschritte. Ein Aufbau dieser Struktur ist allerdings nur bei Netzausbau notwendig. Legt man eine 200 Mips CPU (z.B. DEC AXP 600) zugrunde, so benötigt man für ein Netz ähnlicher Größe wie das unter Punkt 5 beschriebene Testnetz ca. 3s CPU-Zeit.

Die Größe der Struktur *Parkett* wird folgendermaßen berechnet:

$$(2 \cdot \text{Anzahl Zweige} + \text{Anzahl Terminals}) \cdot 16 \text{ Byte}$$

Für ein Netz in der Größenordnung des Testnetzes ergibt sich die Größe von *Parkett* zu ca. 0.6 MByte.

Fig. 18 zeigt die benötigte CPU-Zeit in 10 Mips*s für die Initialisierung der statischen Topologie *Parkett* mit den aktuellen Status aller Netzzweige:

Eine Initialisierung der Topologie ist typischerweise beim Systemstart, nach Datenänderungen und je nach Doppelrechner-Philosophie beim Rechnerwechsel notwendig. Für ein Netz in der Größenordnung des Testnetzes wäre die Initialisierung auf einer 200 Mips CPU in ca. 25 Millisekunden CPU-Zeit abgeschlossen.

Fig. 19 zeigt die benötigte CPU-Zeit in 10 Mips*ms für den Update der Topologie *Parkett* mit dem aktuellen Status eines Netzzweigs:

Die mittlere Zeit für einen Update der Topologiestruktur bei einer Statusänderung z.B. eines Schalters beträgt für ein Netz in der Größenordnung des Testnetzes für eine 80486 CPU mit 40MHz ca. $8.0 \cdot 10^{-5}$ s. Für eine 200 Mips CPU liegt sie in der Größenordnung von ca. $4.0 \cdot 10^{-6}$ s. Diese Zeit ist um mehrere Größenordnungen schneller, als die Zeiten der momentan eingesetzten und bekannten Verfahren. Hierdurch sind gänzlich neue Konzepte bei der Topologieverarbeitung sowie bei den anschließenden Berechnungsverfahren möglich. Zum Beispiel können alle Zweige des Netzes nach jedem Update darauf untersucht werden, ob der jeweilige Zweig die einzige Verbindung (kritischer Zweig) zwischen zwei Teilnetzen ist. Für ein Netz in der Größenordnung des Testnetzes und eine 200 Mips CPU würde die CPU-Gesamtzeit inklusive Update ca.

$$2 \cdot \text{Anzahl Zweige} \cdot T_{\text{update}} \approx 100 \text{ Millisekunden}$$

dauern. Weiterhin zeigt dieses Beispiel, daß die kumulierte CPU-Zeit für die Ausführung von Updates für alle Schalter in diesem Beispiel ca. 50 Millisekunden beträgt. Dies ist nur etwa die doppelte Zeit, die die Initialisierung benötigt und ein weiterer Hinweis, daß der Update bei diesem Verfahren nur die wirklich notwendigen Änderungen der Datenstruktur umfaßt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Initialisierung und Aktualisierung eines Netzmodells, wobei die Netztopologie in Form eines Netzgraphen unter Anwendung und Erweiterung von Sparse-Vector-Verfahren und Sparse-Matrix-Verfahren durch nachstehende Schritte gebildet wird:

- a) Bereitstellung erfaßter Netztopologiedaten in Form einer Terminal-Adjazenz-Matrix;
- b) Umformung der Terminal-Adjazenz-Matrix in eine obere Dreiecksmatrix, wobei zusätzliche fiktive Verbindungszweige entstehen können;
- c) Initialisierung der oberen Dreiecksmatrix, wobei jedes Element der oberen Dreiecksmatrix aufgrund des zugehörigen Zweigstatus initialisiert wird, und wobei

c1) jede zu einem eingeschalteten Zweig gehörendes Element mit einer kleinen negativen ganzzahligen Konstante K initialisiert wird, die so gewählt ist, daß sie durch die weiteren Verarbeitungsschritte nicht größer als Null werden kann, und

c2) jede zu einem ausgeschalteten oder fiktiven Zweig gehörendes Element mit Null initialisiert wird,

d) Bildung der Matrixprodukte für alle Zeilen i (i = 1 bis maximale Anzahl der Zeilen), der oberen Dreiecksmatrix ab und ausschließlich der Diagonalen nach folgender Regel: falls die Elemente i,j und i,k ungleich Null sind,

sind die Elemente aller Schnittpunkte des Zeilen- und Spalten-Bruchstückes der oberen Dreiecksmatrix um 1 zu inkrementieren, wobei j und k Laufindizes für alle Elemente der betreffenden Zeile sind;

e) Bildung einer Pfad-Tabelle aus der oberen Dreiecksmatrix, wobei die Pfad-Tabelle für jede Zeile bzw. jedes Terminal der oberen Dreiecksmatrix den inzidenten Terminal-Index des ersten von Null verschiedenen Elementes dieser Zeile angibt;

f) Aktualisierung der oberen Dreiecksmatrix im Fall einer Änderung der erfaßten Netztopologiedaten, also einer Statusänderung eines Netzzweiges, durch folgende Maßnahmen:

f1) im Fall einer Ausschaltung eines Netzzweiges: vom entsprechenden aktuellen (= bisherigen) Wert des Matrixelementes wird die Konstante K subtrahiert;

f11) falls dieses Element dadurch zu Null wird, sind die Elemente aller Schnittpunkte der oberen Dreiecksmatrix dieses Zeilen- und Spalten-Elementes mit allen anderen Elementen ungleich Null der zugehörigen Zeile bzw. Spalte, rechts bzw. unterhalb der Diagonalen um 1 zu dekrementieren; falls dadurch weitere Elemente zu Null werden, wird für diese die Operation in f11) wiederholt;

f2) im Fall des Einschaltens eines Netzzweiges: zum aktuellen Wert des Matrixelementes wird die Konstante K addiert;

f21) falls dieses Element dadurch zu K oder für weitere Wiederholungen zu 1 wird, sind die Elemente aller Schnittpunkte der oberen Dreiecksmatrix dieses Zeilen- und Spalten-Elementes mit allen anderen Elementen ungleich Null der zugehörigen Zeile bzw. Spalte, rechts bzw. unterhalb der Diagonalen um 1 zu inkrementieren; falls dadurch Elemente zu Eins werden, wird für diese die Operation in f21) wiederholt;

g) Aktualisierung der Pfad-Tabelle entsprechend dem Schritt e);

h) Kennzeichnung der Komponenten des Netzgraphen anhand der Pfad-Tabelle, wobei ausgehend vom ersten Terminal-Index der Tabelle allen Terminals des zugehörigen Teil-Pfades die gleiche Komponenten-Kennzeichnung zugeordnet wird; ergibt sich beim Durchlaufen weiterer Teil-Pfade eine schon vergebene Kennzeichnung (durch Treffen auf eine Komponente, der schon eine Kennzeichnung zugeordnet ist), so wird diese Kennzeichnung dem gerade durchlaufenen Teil-Pfad zugeordnet; der Netzgraph zerfällt in Teil-Graphen entsprechend der Anzahl vergebener Kennzeichnungen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Konstante K eine ausreichend große positive Zahl ist, und anstatt Dekrement- Inkrementoperationen und umgekehrt auf die Matrixelemente ausgeführt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bereitstellung der Netztopologiedaten in einer zweckmäßigen Datenstruktur interne und externe topologische Adressen verwendet werden, wobei ausgehend von einer definierten topologischen Hierarchie jede Hierarchiestufe mit einem Identifizierer bezeichnet wird, und in einer externen topologischen Adresse eines Terminals (niedrigste Hierarchiestufe) die Zugehörigkeit zu bestimmten Komponenten der höheren Hierarchiestufen enthalten ist, woraus die abstrakten Endpunkte des Netzgraphen als interne topologische Adressen ableitbar sind.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß Meßwerte und Schutzmeldungen topologisch zugeordnet werden, wobei im Fall des Modells eines elektrischen Netzes Leistungsmeßwerte als gerichtete impedanzlose Zweige und Spannungsmeßwerte als Objekte mit einer externen topologischen Adresse modelliert werden.

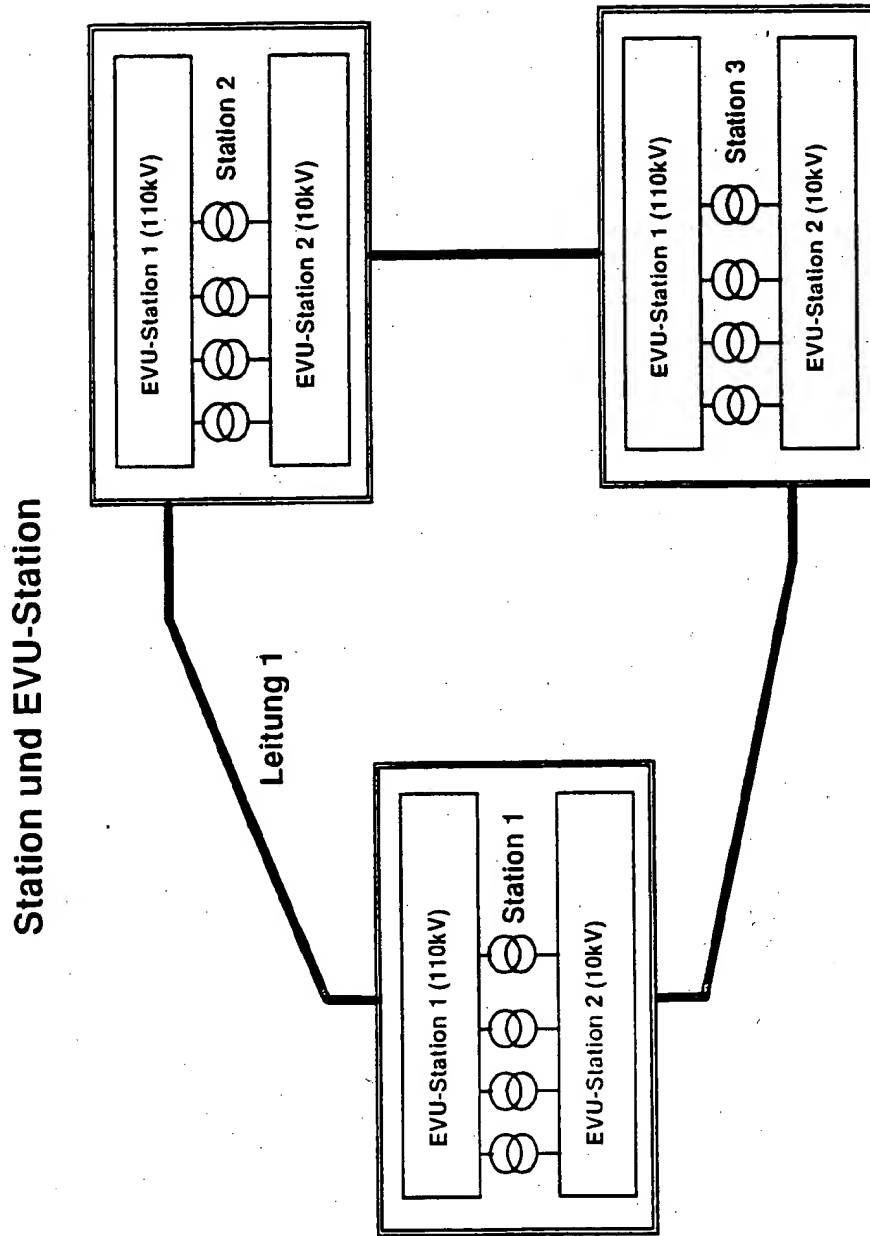


Fig. 1: Station/EVU-Station

Feld und Terminal in der EVU-Station

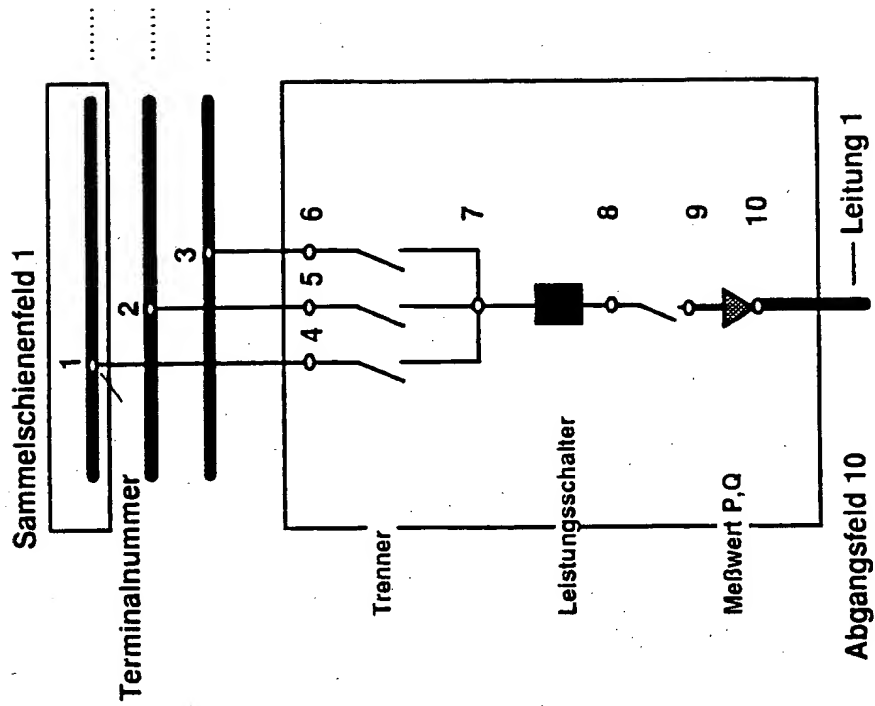


Fig. 2: Aufbau eines Feldes in einer EVU-Station

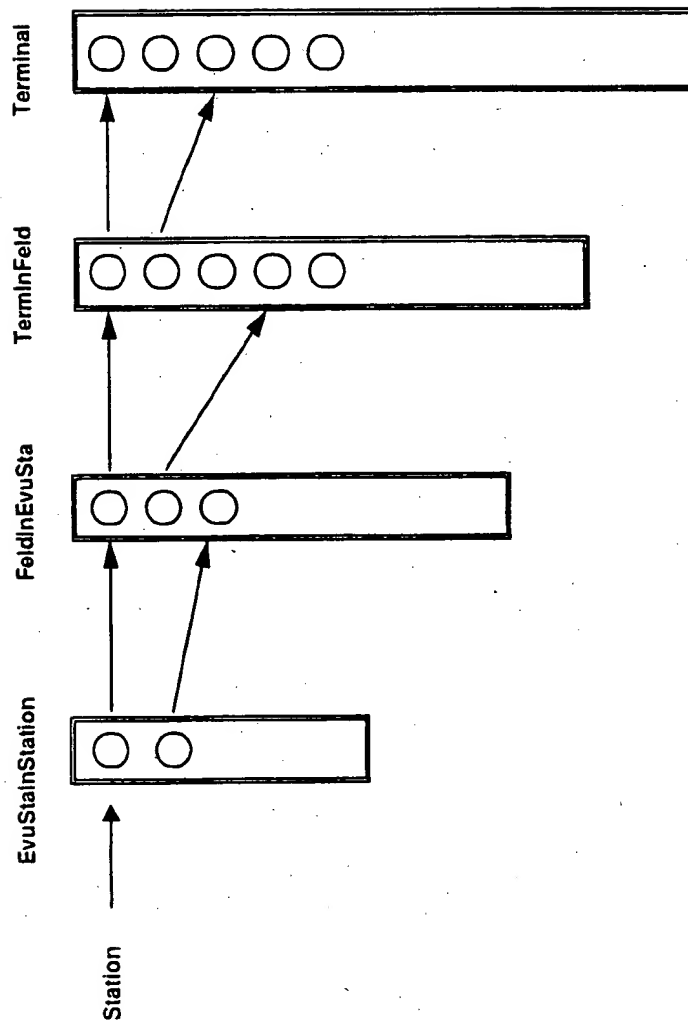


Fig. 3: Transformation der externen in die interne topologische Adresse

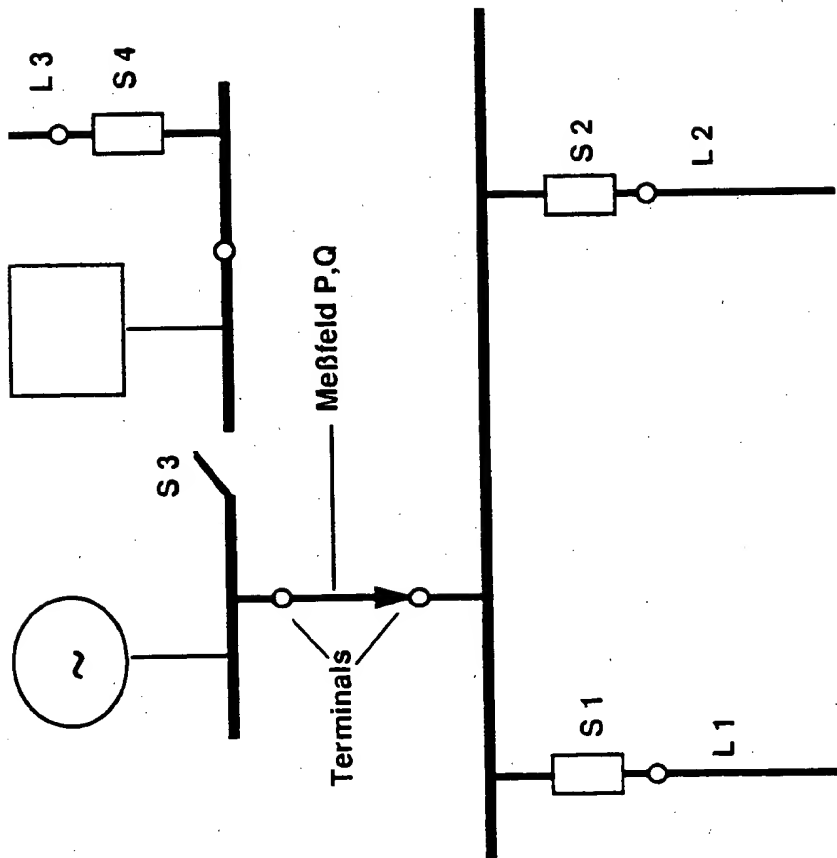


Fig. 4: Meßwertzuordnung

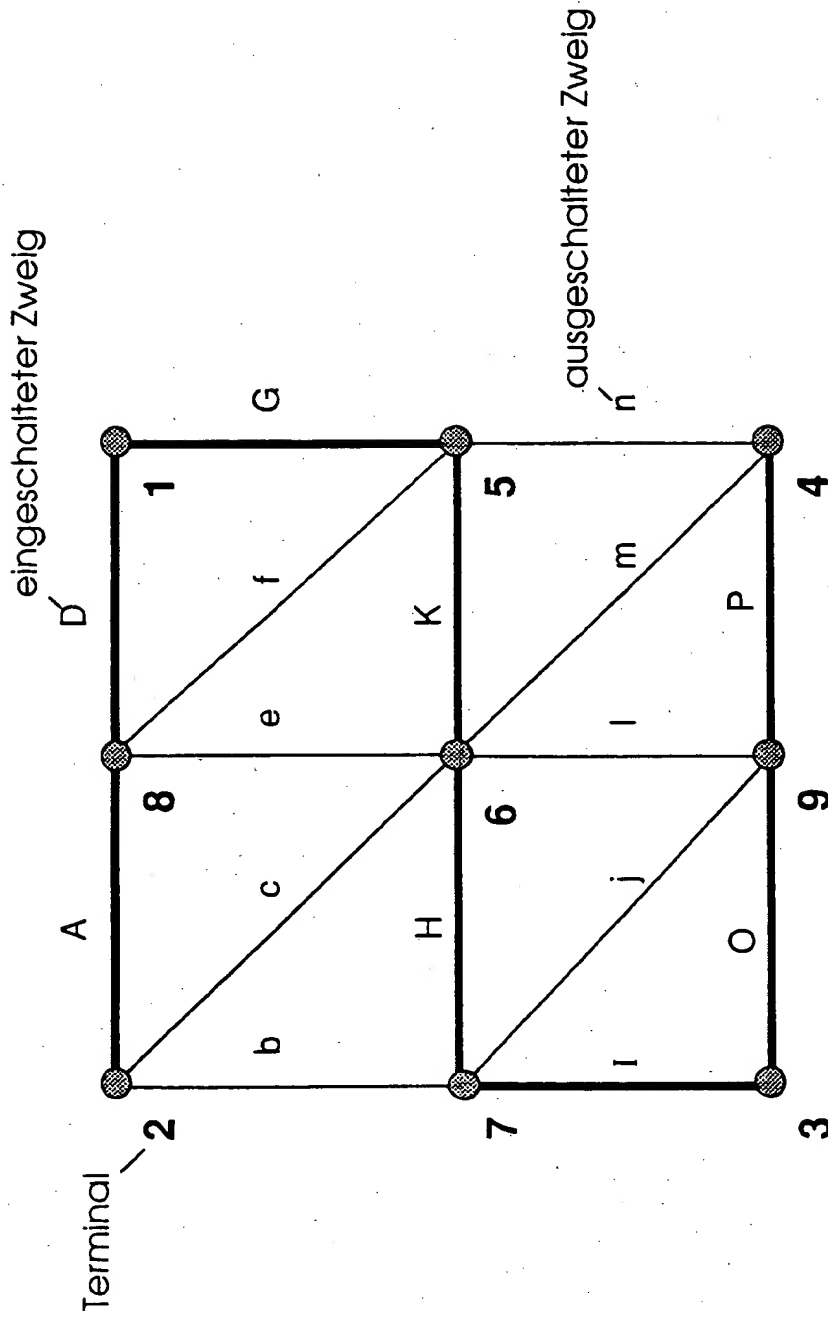


Fig. 5: Beispielgraph

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	•							
2		•						
3			•					
4				•				
5	g			n	•			
6		c		m	k	•		
7		b	i		h	•		
8	d	a			e		•	
9			o	p	l	j		•

strukturelle LDU-Zerlegung

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	•							
2		•						
3			•					
4				•				
5					•			
6						•		
7							•	
8								•
9								

Fig. 6: Terminal-Adjazenz-Matrix und deren LDU-Zerlegung

1	•				G			D	
2		•				c	b	A	
3			•				I		O
4				•	n	m			P
5	G				•	K		f	Δ
6						•	H	e	I
7							•	Δ	j
8	D							•	Δ
9									•

Fig. 7: Initialisierung der Upper-Matrix

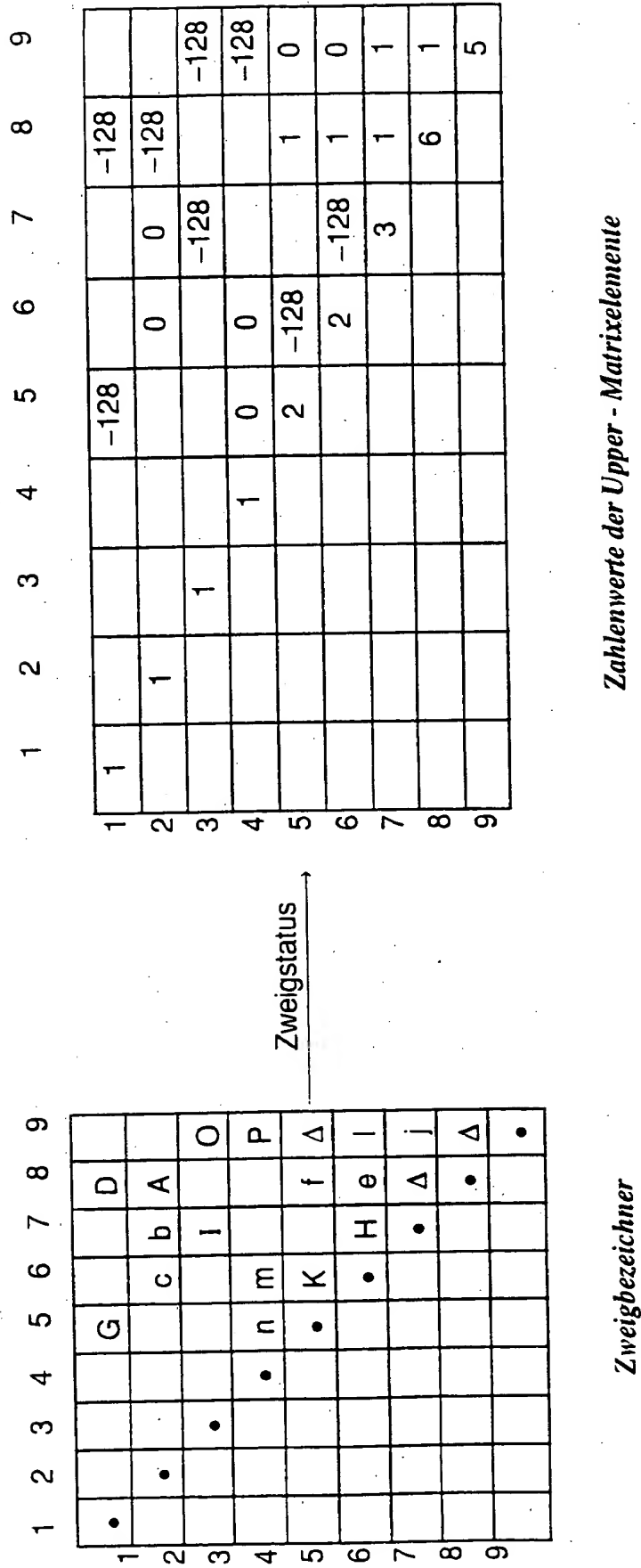


Fig. 8: Ganzzahlig initialisierte Upper-Matrix Parkett[]

Terminal	erste besetzte Spalte in PathTable[]
1	5
2	8
3	7
4	9
5	6
6	7
7	8
8	9
9	0

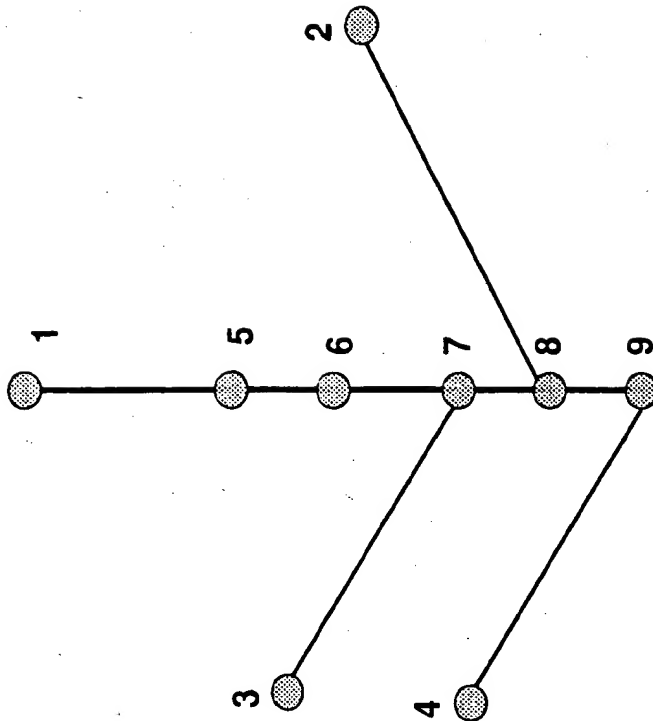


Fig. 9: Inhalt der Struktur PathTable[] und der Path Graph für obigen Beispielgraph

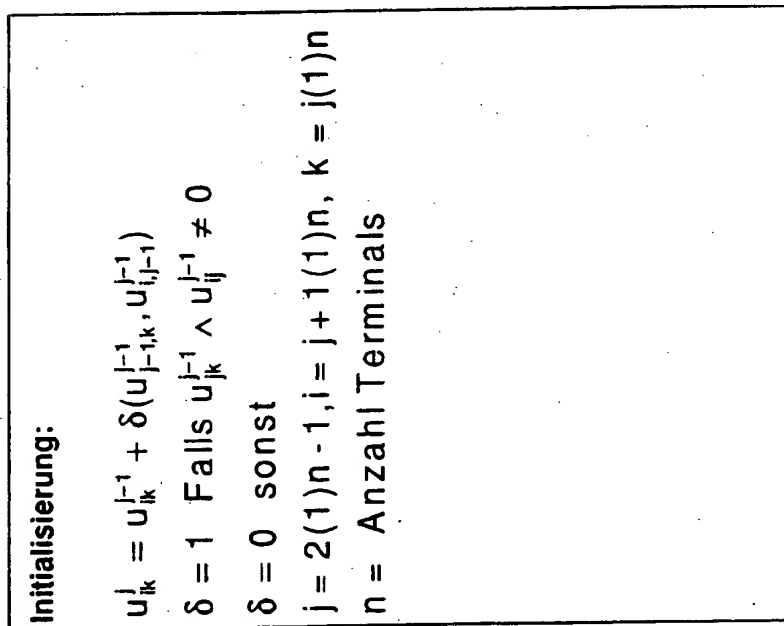
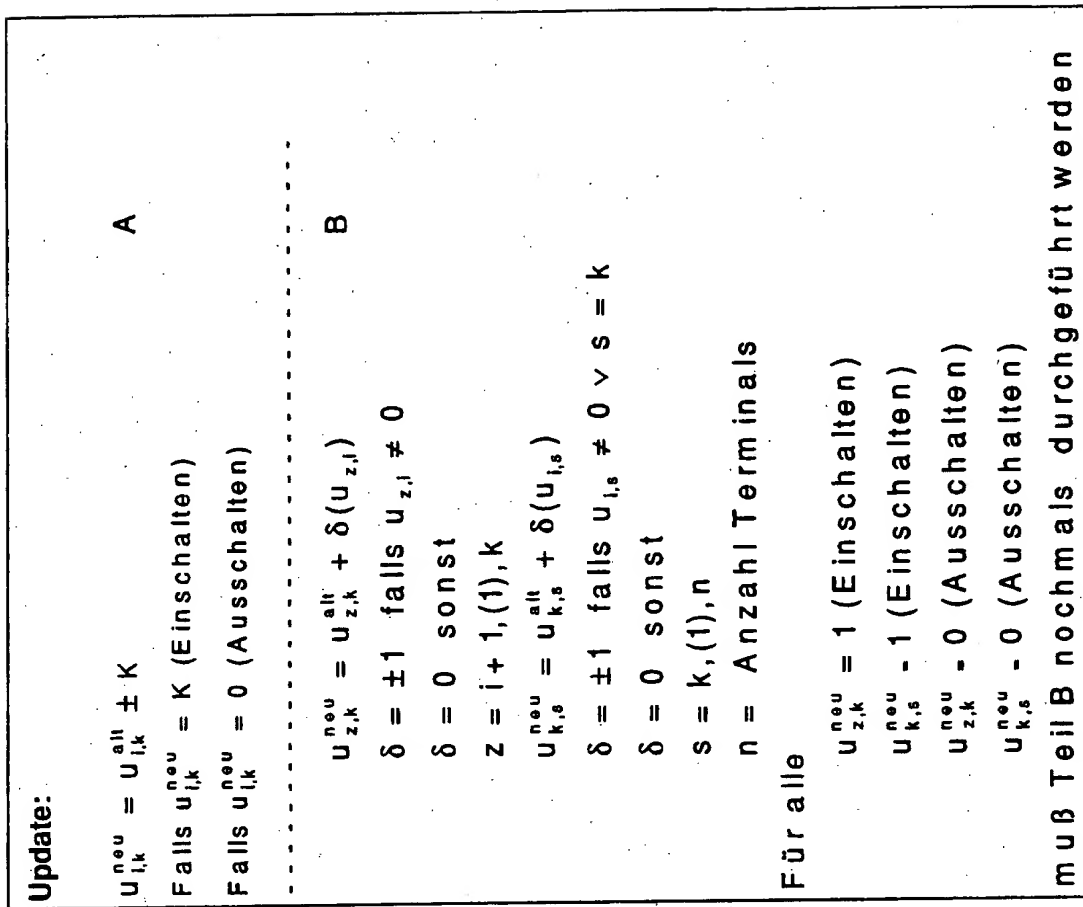


Fig. 10: Mathematische Formulierung von Initialisierung und Update

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	•								
2		•							
3			•						
4				•					
5					•				
6						•			
7							•		
8								•	
9									•

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1					$\Rightarrow 0$			-128
2		1					0	0	-128
3				1				-128	-128
4					1	0	0		-128
5						$\Rightarrow 1$	-128		$\Rightarrow 0$
6							2	-128	$\Rightarrow 0$
7								3	$\Rightarrow 0$
8									$\Rightarrow 3$
9									$\Rightarrow 4$

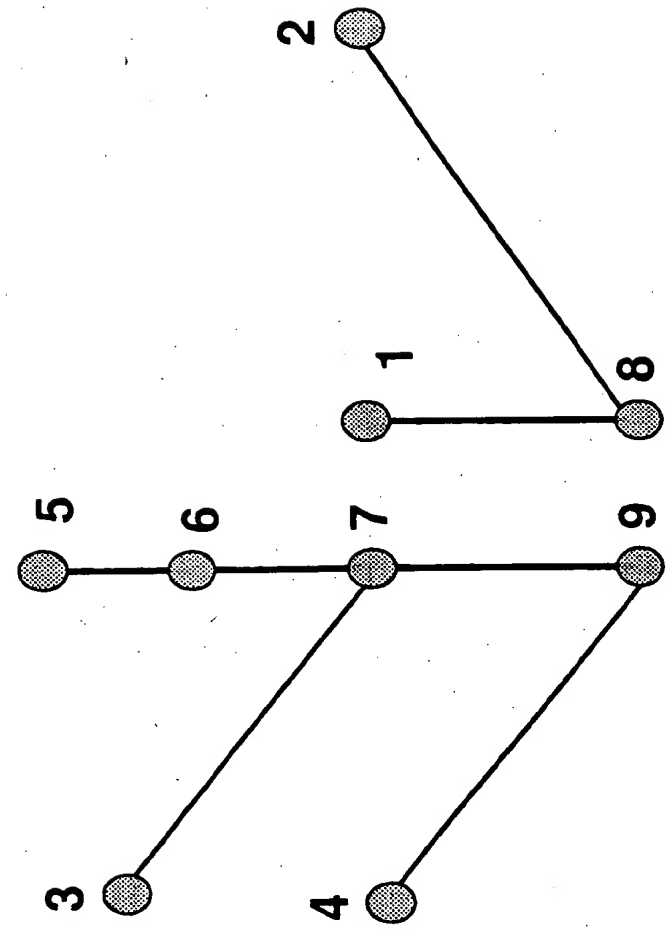
Zweigstatus \rightarrow

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1					G \Rightarrow g			D	
2						c	b	A	
3							I		O
4						n			P
5						•	K	f \Rightarrow f	Δ
6							H	e \Rightarrow e	I
7								$\Delta \Rightarrow \Delta$	j
8									$\Delta \Rightarrow \Delta$
9									•

Zweigbezeichner

Zahlenwerte der Upper - Matrixelemente

Fig. 11: Ganzzahlig aktualisierte Upper-Matrix Parkett[]



Terminal	erste besetzte Spalte in asParket[]
1	8
2	8
3	7
4	9
5	6
6	7
7	9
8	0
9	0

Fig. 12: Inhalt der Struktur PathTable[] und der Path Graph für obigen modifizierten Beispielgraphen

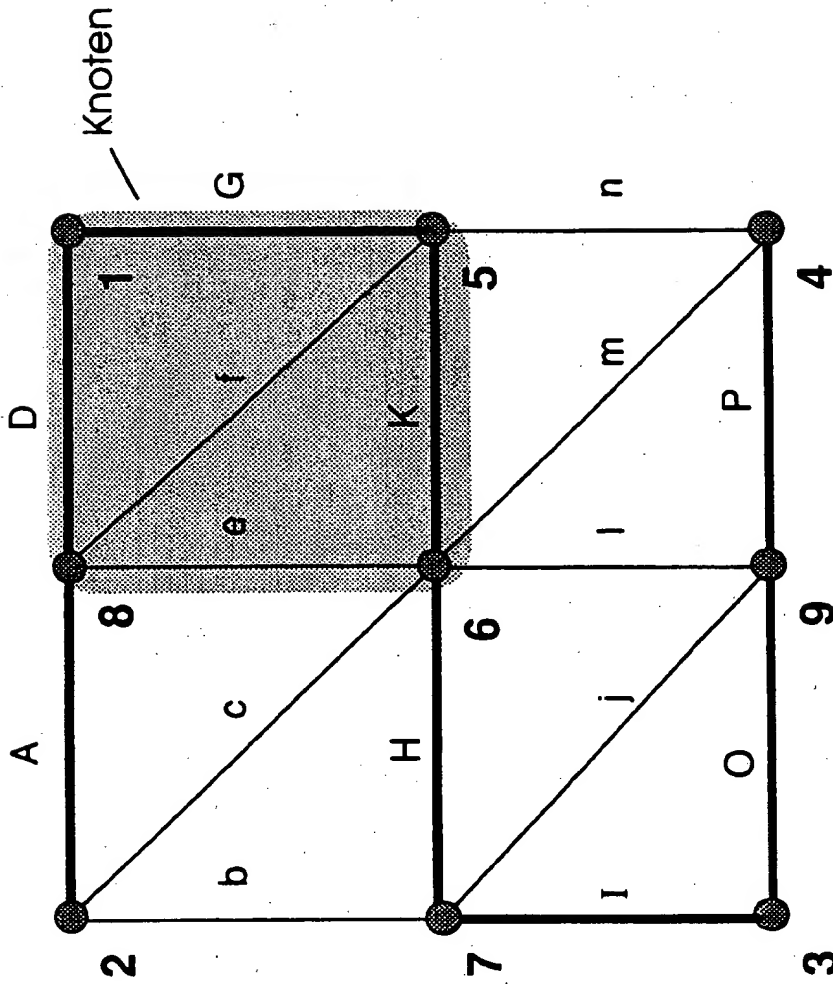


Fig. 13: Knoten-Zweig-Netz

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	•	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	•	-	-	-	c	b	A	-
3	-	-	•	-	-	-	I	-	O
4	-	-	-	•	n	m	-	-	P
-	-	-	-	-	•	-	-	-	Δ
-	-	-	-	-	-	•	H	-	I
7	-	-	-	-	-	-	•	Δ	j
8	-	-	-	-	-	-	-	•	Δ
9	-	-	-	-	-	-	-	-	•

Filter →

	2	3	4	7	8	9
2	•	-	-	-	-	-
3	-	•	O	j	I	P
4	-	-	•	I	-	-
7	-	-	-	•	H Δ	-
8	-	-	-	-	•	m $\eta\Delta$
9	-	-	-	-	-	•

Fig. 14: Ableitung der Knoten-Admittanz-Matrix

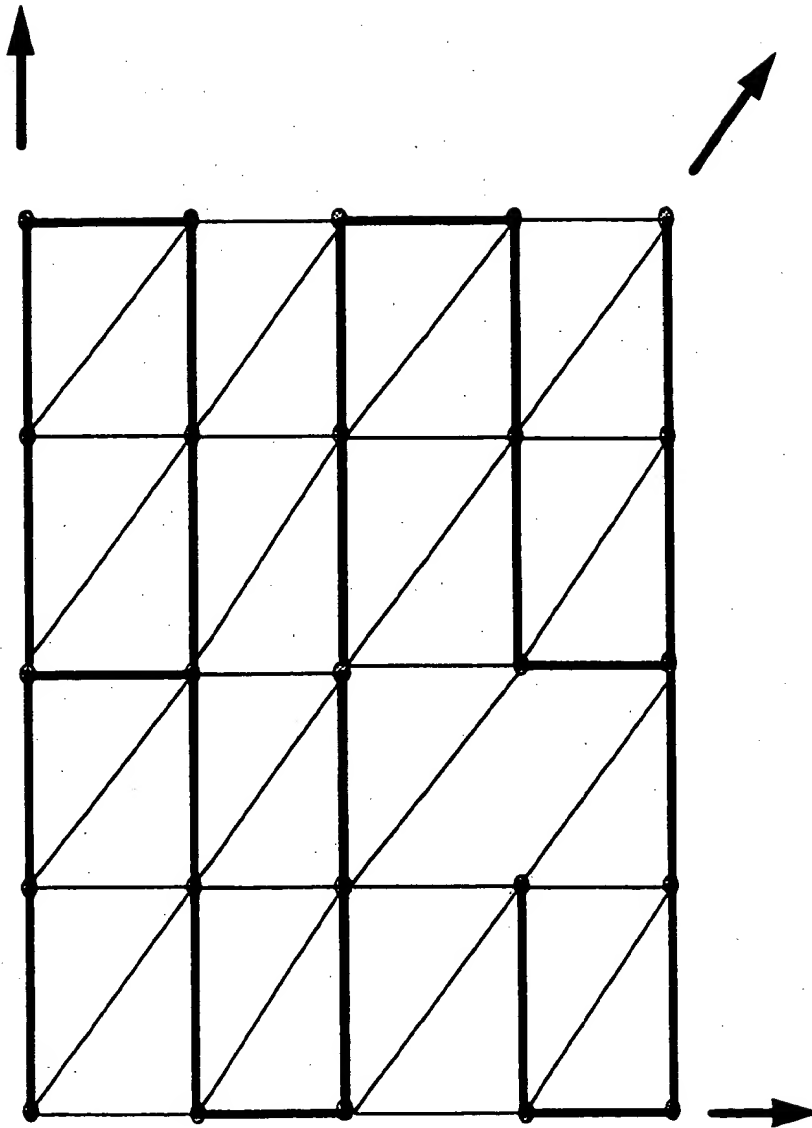


Fig. 15: Testgraphen für Performancemessungen

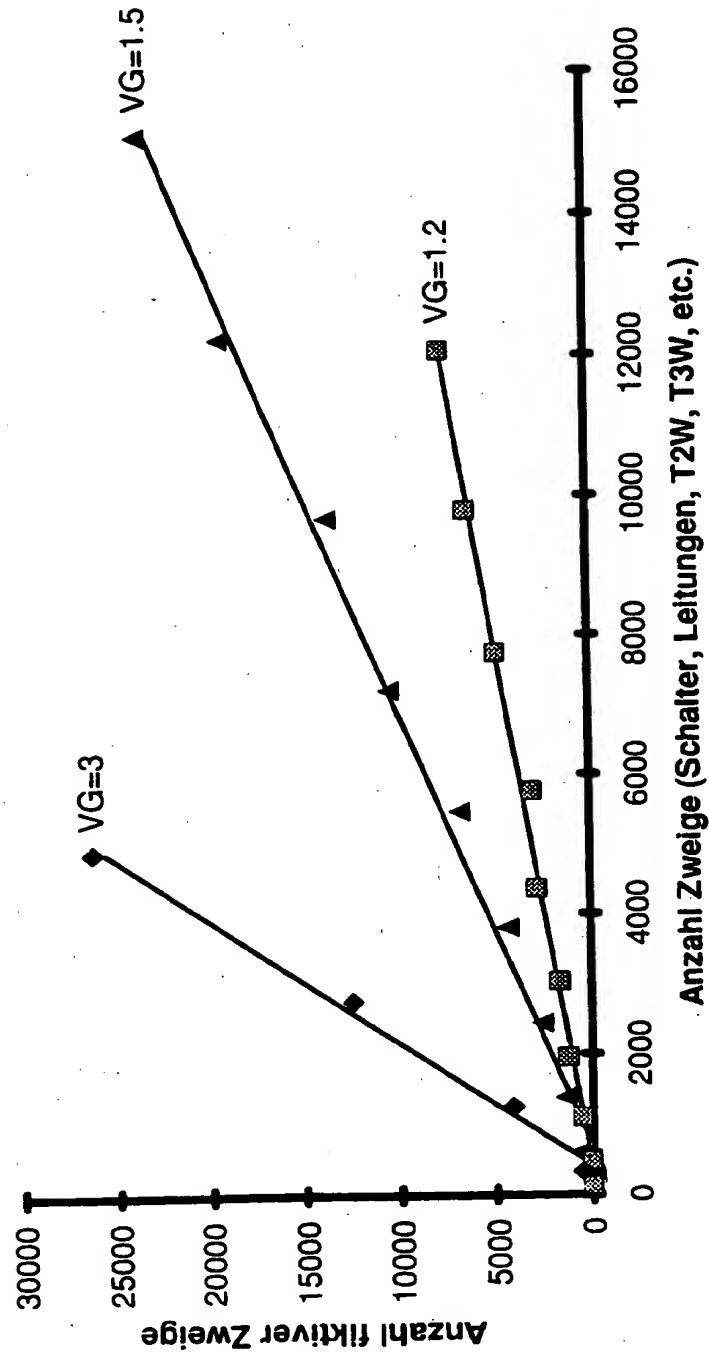


Fig 16: Fiktive Zweige in Abhängigkeit der Netzgröße und des Vermaschungsgrad

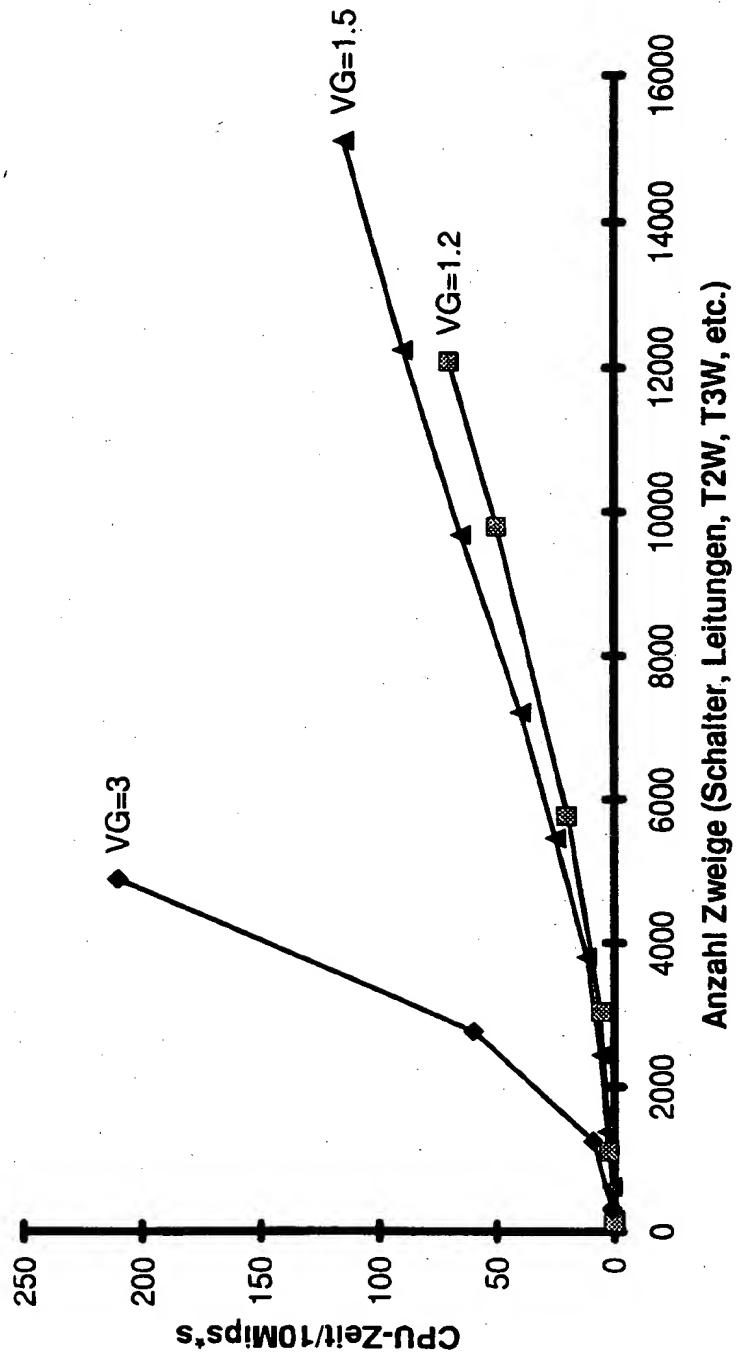


Fig. 17: CPU-Zeit zum Aufbau der statischen Topologie

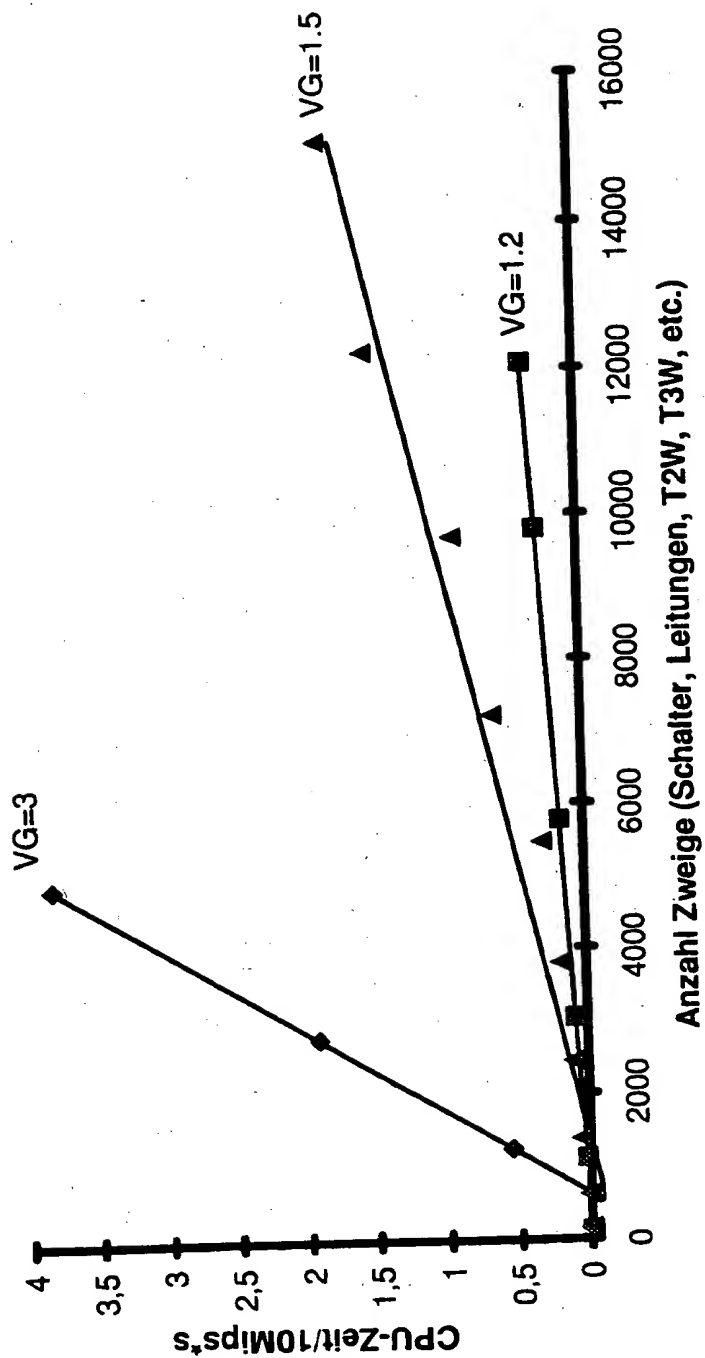


Fig. 18: CPU-Zeit zur Initialisierung der statischen Topologie

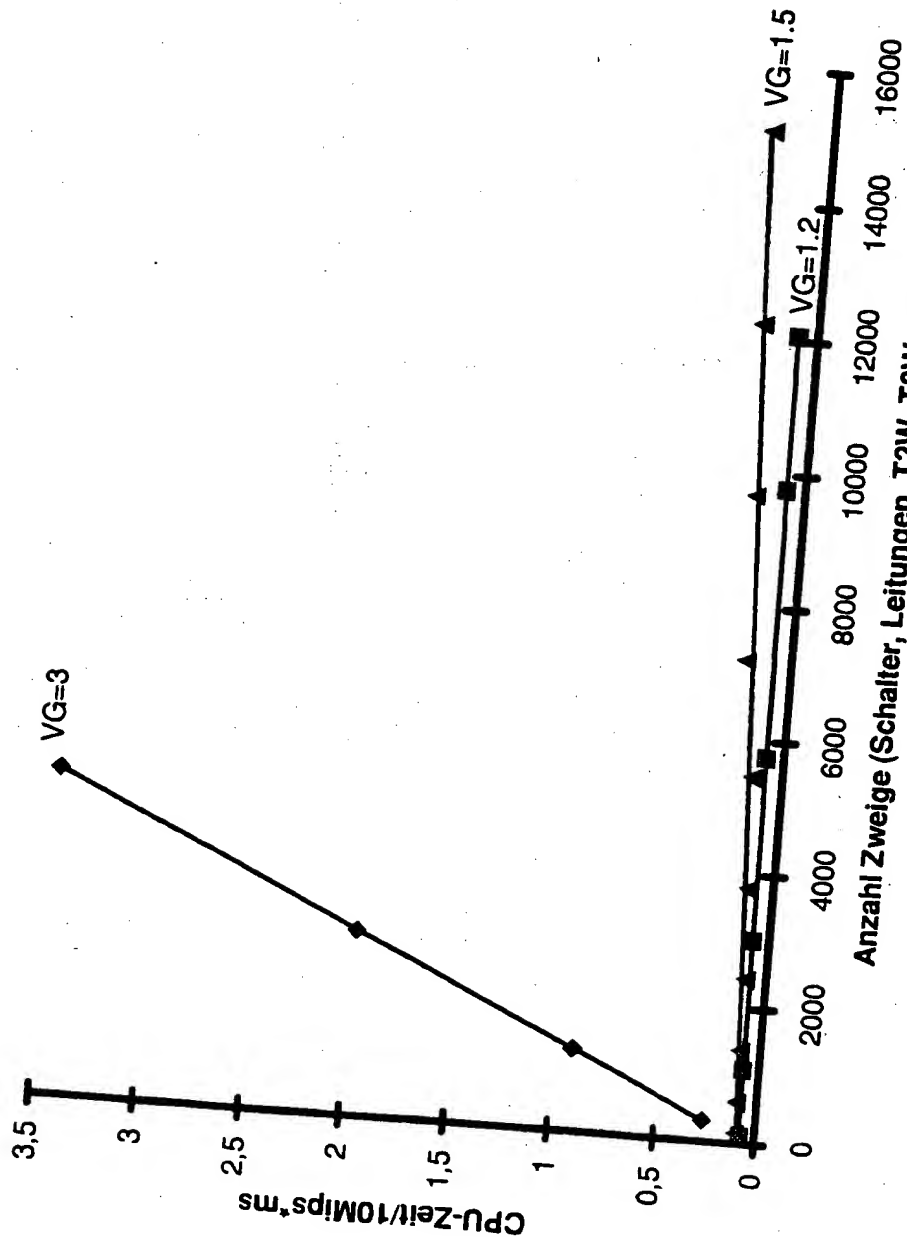


Fig. 19: CPU-Zeit für den Update der Topologie für Statusänderung eines Netzzweigs